



⑯ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES

PATENTAMT

⑯ Offenlegungsschrift  
⑯ DE 41 08 966 A 1

⑯ Int. Cl. 5:  
G 02 F 1/03  
G 02 F 1/19

DE 41 08 966 A 1

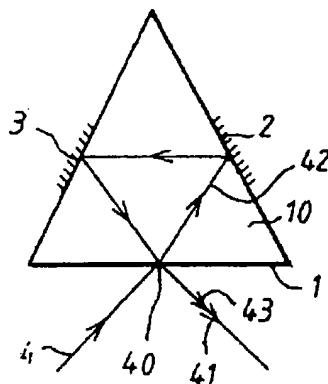
⑯ Aktenzeichen: P 41 08 966.9  
⑯ Anmeldetag: 19. 3. 91  
⑯ Offenlegungstag: 24. 9. 92

⑯ Anmelder:  
IOT Entwicklungsgesellschaft für Integrierte  
Optik-Technologie mbH, 8833 Waghäusel, DE

⑯ Erfinder:  
Haussühl, Siegfried, Prof. Dr.; Baolin, Wang, Dr.,  
5000 Köln, DE

DE 41 08 966 A 1

⑯ Elektro-optischer interferometrischer Lichtmodulator  
⑯ Elektro-optischer interferometrischer Lichtmodulator mit  
- einem einzigen Kristall (10) mit mindestens drei ebenen  
Stirnseiten (1, 2, 3), dessen Brechzahl durch das an ihn  
angelegte elektrische oder magnetische Feld veränderbar  
ist,  
- einem schrägwinklig auf eine erste Stirnseite (1) einfallen-  
den Lichtstrahl (4), der an dieser ersten Stirnseite in einen  
reflektierten Strahl (41) und einen gebrochenen Strahl (42)  
aufgespalten wird,  
wobei mindestens zwei weitere Stirnseiten (2, 3) so ausge-  
bildet sind, daß der gebrochene Strahl (41) nach Reflexion  
an den zwei weiteren Stirnseiten (2, 3) und zweiter Brechung  
an der ersten Stirnseite (1) dem reflektierten Strahl (41)  
überlagert wird und mit diesem interferiert.  
Der Kristall (10) hat zwei zu den Stirnseiten (1, 2, 3)  
senkrechte Deckseiten (11, 12), auf den Deckseiten (11, 12)  
sind Elektroden (111, 121) angebracht, die an eine steuerbare  
Spannungsquelle U angeschlossen sind, und der Kristall (10)  
zeigt Kerr-Effekt.  
Abwandlung eines Fizeau-Interferometers. Einfach, hoher  
Wirkungsgrad.



1  
Beschreibung

Die Erfindung betrifft einen elektro-optischen interferometrischen Lichtmodulator.

Aus der US 45 04 121 ist ein derartiger Modulator bekannt, der zugleich als Schalter zwischen verschiedenen Ein- und Ausgängen ausgelegt ist. Die Anordnung weist zwei elektrooptische Kristalle mit Elektroden auf ihren Oberflächen auf, die jeweils vier Stirnflächen benötigen, von denen eine mit einer dielektrischen Schicht belegte jeweils direkt am anderen Kristall anliegt. Eine zu dieser Stirnfläche parallele zweite Stirnfläche dient jeweils als Vollspiegel.

Ein- und Austritt erfolgen senkrecht durch die beiden weiteren Stirnflächen. Jeder an einem Ausgang zur Interferenz mit einem anderen Strahl gelangende Strahl muß an der gemeinsamen teilreflektierenden Stirnfläche mindestens zweimal reflektiert oder gebrochen werden, so daß jeder dieser Strahlen nicht mehr als 25 Prozent der Eingangsamplitude aufweisen kann. Weitere Verluste sind durch nichtideale Verspiegelung und Justage aller acht Stirnseiten unvermeidlich.

Reine Modulatoren werden üblicherweise als Mach-Zehnder-Interferometer aufgebaut, in dessen einem Arm ein elektrooptischer Kristall angeordnet ist. Durch den geringen Effekt der Feldstärke auf den Brechungsindex sind für einen hohen Modulationsgrad jedoch relativ große Kristallabmessungen und Betriebsspannungen erforderlich.

Es ist die Aufgabe der Erfindung, einen elektro-optischen interferometrischen Lichtmodulator von einfacherem und unempfindlichem Aufbau anzugeben, der nur einen kleinen elektro-optischen Kristall benötigt und mit geringen Betriebsspannungen auskommt und dabei minimale Lichtverluste hat.

Die Lösung gelingt bei einem gattungsgemäßen Lichtmodulator mit

- einem einzigen Kristall mit mindestens drei ebenen Stirnseiten, dessen Brechzahl durch das an ihn angelegte elektrische oder magnetische Feld veränderbar ist,
- einem schrägwinklig auf eine erste Stirnseite einfallenden Lichtstrahl, der an dieser ersten Stirnseite in einen reflektierten Strahl (41) und einen gebrochenen Strahl aufgespalten wird,

wobei mindestens zwei weitere Stirnseiten so ausgebildet sind, daß der gebrochene Strahl nach Reflexion an den zwei weiteren Stirnseiten und zweiter Brechung an der ersten Stirnseite dem reflektierten Strahl überlagert wird und mit diesem interferiert, gemäß dem Kennzeichen des Anspruchs 1. Dabei ist es vorteilhaft, wenn gemäß Anspruch 2 der Kristall zwei zu den Stirnseiten senkrechte Deckseiten hat, auf den Deckseiten Elektroden angebracht sind, die an eine steuerbare Spannungsquelle angeschlossen sind, und der Kristall Pockels-Effekt zeigt.

Merkmale weiterer vorteilhafter Ausführungsformen sind einzeln und in Kombination die lineare Polarisation des einfallenden Lichtstrahls, eine dielektrische Strahleiterschicht auf der ersten Stirnseite, die damit erreichte Intensitätsanpassung der zwei interferierenden Lichtstrahlen (Anspruch 5), deren Amplitude von jeweils mehr als 30 Prozent der Amplitude des einfallenden Lichtstrahls, zusätzliche Spiegelflächen im Kristall (Anspruch 7), die Nutzung der Totalreflexion und die Einsparung von Kristallvolumen durch weitere Stirnflä-

## 2

chen.

Der Modulator ist als ein modifiziertes Fizeau-Interferometer aufzufassen. Der Modulator besteht nur aus einem Kristall. Es erfolgt der Eintritt der Lichtwelle in schiefen Inzidenz, und zwar aus zwei Gründen: erstens soll die Amplitude des primär reflektierten Strahles dadurch erhöht werden, zweitens soll dadurch die Strahlführung des primär gebrochenen Strahls im Modulator so eingerichtet werden, daß er nach mehrfacher Reflexion im Inneren schließlich durch Brechung an der Einfallsstelle des Primärstrahls einen zweiten Strahl erzeugt, der sich mit dem primär reflektierten Strahl interferenzfähig überlagert, d. h. nicht nur richtungsmäßig, sondern auch räumlich mit diesem zusammenfällt, drittens wird dadurch der Lichtweg im Kristall erhöht und damit der integrierte elektro-optische Effekt.

Durch weitere Spiegelflächen ist der dritte Effekt ohne weiteres noch steigerbar.

Im weiteren wird die Erfindung anhand der Zeichnung in ihren Einzelheiten beschrieben.

Fig. 1 zeigt schematisch einen Schnitt durch die Mittelebene, senkrecht zu den Stirnseiten eines Lichtmodulators,

Fig. 2 zeigt einen dazu orthogonalen Schnitt desselben Lichtmodulators,

Fig. 3 zeigt eine Ausführungsform mit einer zusätzlichen reflektierenden Stirnseite in einer Darstellung wie Fig. 1,

Fig. 4 zeigt eine Ausführungsform mit weiteren Stirnflächen zur Einsparung von Kristallvolumen, die ansonsten Fig. 1 entspricht.

Gleiche Elemente sind in allen Figuren mit gleichen Bezeichnungen versehen.

In Fig. 1 ist der Schnitt durch einen Kristall (10) in Gestalt einer Dreiecks-Säule mit drei Stirnseiten (1, 2, 3) dargestellt. Die Deckseiten (11 und 12) sind mit Elektroden (111 und 121) belegt und über Anschlußleitungen (112 und 122) mit einer Spannungsquelle U, die entsprechend der gewünschten Modulation steuerbar ist, angeschlossen, wie Fig. 2 zeigt.

Der Kristall (10) hat eine typische Dicke von bis zu 1 mm bei Kantenlängen von 5 mm bis 10 mm.

Alle bekannten elektro-optischen Kristalle sind geeignet, insbesondere sind die Materialien und andere Details der o. g. US 45 04 121 geeignet. Demnach ist ein Lithiumniobatkristall mit parallel zu den Stirnseiten (1, 2, 3) orientierter Kristallachse geeignet, mit Steuerspannungen U von einigen zehn Volt und für Modulationsfrequenzen bis in den Gigahertzbereich.

Auf die erste Stirnseite (1) trifft schrägwinklig der einfallende Lichtstrahl (4), der vorzugsweise zur Vermeidung von Verlusten parallel zur Stirnseite (1) linear polarisiert ist, und wird aufgeteilt in den reflektierten Strahl (41) und den gebrochenen Strahl (42). Der Anteil des reflektierten Strahls (41) kann durch geeignete Ausführung einer teilverspiegelten Schicht auf der Stirnseite (1) bestimmt werden, beispielsweise zu 37%.

Hat der gebrochene Strahl (42) im Kristall — u. a. durch die Reflexion an den Stirnseiten (2 und 3) und an der Innenseite der Stirnseite (1) vor dem Austritt als Strahl (43) — 50% Verlust, so sind dann die Amplituden des reflektierten Strahls (41) und des austretenden Strahls (43) gerade gleich groß.

Der Einfallswinkel des einfallenden Strahls (4), sein Auftreffort (40) auf der ersten Seitenfläche (1), die Brechzahl des Kristalls (10), Winkel und Längen der Seitenflächen (1, 2, 3), sind so aufeinander abgestimmt, daß der gebrochene Strahl (42) nach Reflexion an den

Stirnseiten (1 und 2) an den Auftreffort (40) des einfallenden Strahls (4) zurückgelangt und nach der Brechung beim Austritt aus dem Kristall (10) als austretender Strahl (43) mit dem reflektierten Strahl (41) überlagert wird und so nach Art des Fizeau-Interferometers Interferenz auftritt. Aufgrund der Dispersion gilt eine solche Auslegung für eine bestimmte Wellenlänge des einfallenden Strahls (4). Vorteilhafterweise sind die Polarisationsrichtung des einfallenden Strahls (4), die Achsenrichtung des Kristalls (10), die Schnittlinien der die Seitenflächen (1, 2, 3) enthaltenden Ebenen und das elektrische Feld zwischen den Elektroden (111 und 121) zueinander parallel.

Damit werden die Reflexionsverluste minimiert und die Wirkung der angelegten Spannung U auf den optischen Weg des gebrochenen Strahls (42) im Kristall (10) und damit die Modulation optimiert.

Durch kleine Variation des Einfallswinkels des einfallenden Strahls (4) oder seines Auftrefforts (40) kann der Gangunterschied bei der Spannung  $U = OV$  so einjustiert werden, daß er ein ungerades Vielfaches einer Viertelwellenlänge des einfallenden Strahls ist, so daß die Ausgangsintensität der interferierten Strahlen (41 und 43) in erster Näherung linear mit der Spannung U ansteigt.

In Fig. 3 ist in einem Beispiel dargestellt, wie durch Einführung einer zusätzlichen spiegelnden Stirnseite (5) – bei gleichzeitiger Lageanpassung der Stirnseiten (2 und 3) – der Weg des gebrochenen Strahls (42) im Kristall (10) erhöht werden kann, ohne daß dieser größer wird.

Die Geometrie ist wiederum so gewählt, daß der austretende Strahl (43) mit dem reflektierten Strahl (41) zusammenfällt und interferiert.

Fig. 4 zeigt eine weitere Abwandlung der Anordnung nach Fig. 1, bei der der Kristall (10) verkleinert ist bei gleichbleibendem Lichtweg des gebrochenen Strahls (42). Zusätzliche Stirnflächen (61, 62 und 63) begrenzen den Kristall (10) außerhalb des Lichtwegs.

Natürlich können die Maßnahmen nach Fig. 3 und 4 auch kombiniert werden und ist die Zahl der spiegelnden Stirnflächen (2, 3, 5) und der zusätzlichen Stirnflächen (61, 62 und 63) frei wählbar.

Die spiegelnden Stirnflächen (2, 3, 5) können mit Metallspiegeln bedampft sein oder es kann die Totalreflexion ausgenutzt werden.

Ein erfindungsgemäßer elektro-optischer Lichtmodulator aus  $KTiOPO_4$  – Kristall von  $5 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$  und 1 mm Dicke in Richtung der polaren  $a_3$ -Achse mit einem Einfallwinkel von  $45^\circ$  und drei Reflexionen des gebrochenen Strahls (42) – hat eine wirksame Brechzahl  $n_3 = 1,813$  bei  $633 \text{ nm}$  und ist so einjustiert, daß der primäre Gangunterschied von reflektiertem Strahl (41) und austretendem Strahl (43) gleich  $(2m+1) \cdot \lambda/4$  mit  $m$  als ganzer Zahl und der Wellenlänge  $\lambda$  ist. Die Kapazität zwischen den Elektroden ist  $15 \text{ pF}$ , die Schwellenspannung  $1 \text{ mV}$ , die Viertelwellenspannung  $30 \text{ V}$  und der erreichte Modulationsgrad  $60\%$ .

## Patentansprüche

60

## 1. Elektro-optischer interferometrischer Lichtmodulator, gekennzeichnet durch

- einen einzigen Kristall (10) mit mindestens drei ebenen Stirnseiten (1, 2, 3), dessen Brechzahl durch das an ihn angelegte elektrische oder magnetische Feld veränderbar ist,
- einen schrägwinklig auf eine erste Stirnsei-

te (1) einfallenden Lichtstrahl (4), der an dieser ersten Stirnseite in einen reflektierten Strahl (41) und einen gebrochenen Strahl (42) aufgespalten wird,

wobei mindestens zwei weitere Stirnseiten (2, 3) so ausgebildet sind, daß der gebrochene Strahl (42) nach Reflexion an den zwei weiteren Stirnseiten (2, 3) und zweiter Brechung an der ersten Stirnseite (1) dem reflektierten Strahl (41) überlagert wird und mit diesem interferiert.

2. Elektro-optischer interferometrischer Lichtmodulator nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Kristall (10) zwei zu den Stirnseiten (1, 2, 3) senkrechte Deckseiten (11, 12) hat, auf den Deckseiten (11, 12) Elektroden (111, 121) angebracht sind, die an eine steuerbare Spannungsquelle U angeschlossen sind, und der Kristall (10) Pockels-Effekt zeigt (Fig. 2).

3. Elektro-optischer interferometrischer Lichtmodulator nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß der einfallende Lichtstrahl (4) linear polarisiert ist.

4. Elektro-optischer interferometrischer Lichtmodulator nach Anspruch 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß die erste Stirnseite (1) mit einer dielektrischen Strahlteilerschicht belegt ist.

5. Elektro-optischer interferometrischer Lichtmodulator nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß der Reflexionskoeffizient der Strahlteilerschicht so gewählt ist, daß der reflektierte Strahl (41) etwa die gleiche Amplitude hat wie der gebrochene und durch den Kristall verlaufende Strahl (43).

6. Elektro-optischer interferometrischer Lichtmodulator nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die beiden überlagerten und zur Interferenz kommenden Strahlen (41, 43) je mehr als 30 Prozent der Amplitude des einfallenden Lichtstrahls (4) haben.

7. Elektro-optischer interferometrischer Lichtmodulator nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß der Kristall (10) zusätzliche Stirnseiten (5) hat, an denen der gebrochene Strahl (42) im Kristall (10) reflektiert wird, und so der Lichtweg im elektrooptischen Kristall (10) bezogen auf sein Volumen erhöht wird (Fig. 3).

8. Elektro-optischer interferometrischer Lichtmodulator nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Reflexion an den Stirnseiten (1, 2, 3, 5) als Totalreflexion stattfindet.

9. Elektro-optischer interferometrischer Lichtmodulator nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß zur Einsparung von Kristallvolumen zusätzlich weitere Stirnflächen (61, 62, 63) außerhalb des Strahlengangs angeordnet sind (Fig. 4).

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

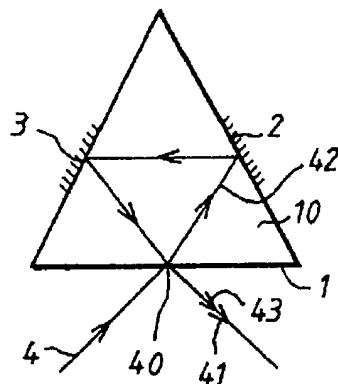


FIG. 1

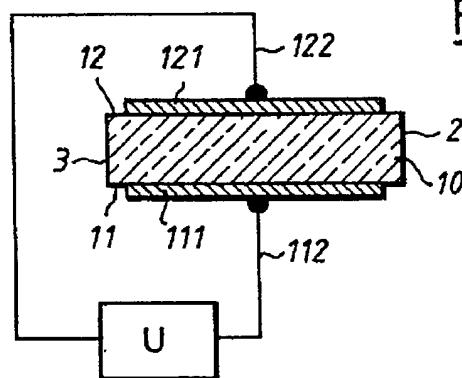


FIG. 2

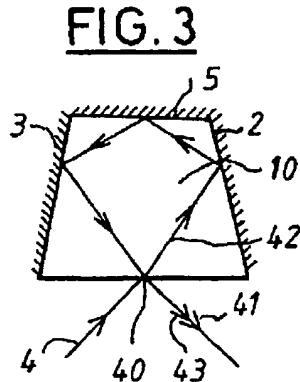


FIG. 3

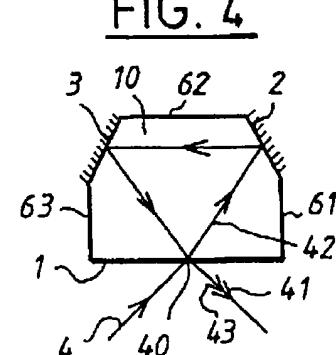


FIG. 4